ChinaXiv合作期刊

DOI：10.14005/j.cnki.issn1672-7673.20230428.002

利用贝叶斯分层模型估算耀变体的多普勒因子

宁宫明，黄伟天，毛李胜*

（云南师范大学物理与电子信息学院，云南 昆明 650500）

摘要：基于亚毫米波阵列(Submillimeter Array，SMA)的 1 mm 波长的长时间监测数据，利用贝叶斯分层模型对耀变体的光变曲线进行拟合，估算了 155 个耀变体的射电亮温度和光变多普勒因子。利用 Wilcoxon 秩和检验，比较了蝎虎座 BL 型天体(BL Lac)子样本和平谱射电类星体(Flat Spectrum Radio Quasar，FSRQ)子样本的亮温度和多普勒因子分布，也比较了费米耀变体和非费米耀变体的亮温度和多普勒因子分布。结果表明：(1)相对蝎虎座 BL 型天体，平谱射电类星体平均具有更高的多普勒因子；(2)相对非费米耀变体，费米耀变体平均具有更高的亮温度和多普勒因子。通过与 15 GHz 波段的亮温度和多普勒因子进行比较发现，射电亮温度和多普勒因子可能有向更高频率降低的趋势。

关键词：耀变体；多普勒因子；亮温度；贝叶斯分层模型

中图分类号：P157　**文献标识码**：A　**文章编号**：1672-7673(2023)05-0403-09

活动星系核(Active Galactic Nucleus，AGN)是宇宙中电磁辐射最强的天体之一，一部分活动星系核能产生向外运动的喷流并发出同步辐射[1]。当活动星系核的喷流方向与观测视线非常接近时，这类源称为耀变体(Blazar)，其主要观测特征有高光度、快速光变、高偏振、视超光速运动等[2]。为了解释这些特殊现象，文[2]提出了一个活动星系核的统一模型。在该模型中，耀变体中心有一个超大质量黑洞，周围围绕着一个吸积盘，喷流从黑洞中心以垂直于吸积盘的方向喷出。耀变体的多波段辐射均由于多普勒效应而被放大[3]。根据光谱中的发射线性质，耀变体可以分为蝎虎座 BL 型天体和平谱射电类星体两个子类。前者光谱中没有发射线或仅有弱发射线，后者表现为强的发射线[4]。

量化喷流的参数之一是多普勒因子 $\delta=[\Gamma(1-\beta\cos\theta)]^{-1}$，其中 Γ 是洛伦兹(Lorentz)因子，定义为 $\Gamma=1/\sqrt{(1-\beta^2)}$，$\beta$ 是以光速为单位的喷流运动速度，θ 是喷流方向与观测视线的夹角[5]。但是，无论是 β 还是 θ 都难以通过测量直接得出，所以直接确定多普勒因子较为困难。考虑到多普勒因子对研究耀变体内禀辐射的重要性和必要性，研究人员提出了许多间接估算多普勒因子的方法。文[6]假设观测到的 X 射线来自同步辐射光子的逆康普顿散射过程，通过比较观测 X 射线流量和根据甚长基线干涉测量(Very Long Baseline Interferometry，VLBI)观测数据的预言 X 射线流量，定义逆康普顿多普勒因子。文[7]假设喷流中磁场和辐射粒子能量均分，比较均分亮温度和观测亮温度，从而得出源的均分多普勒因子。文[8]和文[1]通过将射电光变曲线分解为指数上升和指数下降爆发过程，确定爆发亮温度，最后对比均分亮温度来估算耀变体的多普勒因子，称之为光变多普勒因子。文[9]利用贝叶斯分层模型，将光变曲线建模为随机背景上的指数上升和指数下降过程，通过与均分亮温度比较估算了 837 个耀变体的光变多普勒因子。文[10]通过拟合耀变体的多波段能谱分布(Spectral Energy Distribution，SED)估计了 999 个耀变体的多普勒因子。文[3]提出了一种基于喷流辐射功率和宽线区光度之间的相关性，估算了 350 个耀变体的多普勒因子。以上几种多普勒因子估算方法均基于不同的假设，对于单个源而言，很难确定方法之间的优劣或准确性。

基金项目：国家自然科学基金（12063007）；云南省“兴滇英才支持计划”资助.
收稿日期：2023-04-08；修订日期：2023-04-17
作者简介：宁宫明，男，硕士研究生，主要研究活动星系核. Email：ninggming@163.com.
* 通信作者：毛李胜，男，副教授，主要研究活动星系核. Email：maolisheng@ynnu.edu.cn.

ChinaXiv:202311.00008v1

ChinaXiv合作期刊

ChinaXiv:202311.00008v1

本文利用亚毫米波阵列 1 mm 波长的长时间监测数据，采用与文[9]相同的方法，估算了 155 个耀变体的射电亮温度和多普勒因子，旨在比较耀变体子类的亮温度和多普勒因子分布差异。本文采用的宇宙学参数：$H_0 = 71\ \mathrm{km \cdot s^{-1} \cdot Mpc^{-1}}$，$\Omega_m = 0.27$[11]。无特殊说明，文中亮温度取以 10 为底的对数值。

1 样本和数据

亚毫米波阵列位于夏威夷莫纳克亚山峰。它的一项重要科学任务是持续监测河外射电源[12]，监测波长为 1 mm 和 850 μm，前者的监测密度远大于后者。亚毫米波阵列的流量数据定期更新，授权使用后可通过 SMA 官网下载(http://sma1.sma.hawaii.edu/callist/callist.html)。通过与第 5 版罗马耀变体星表(Roma-BZCAT)进行小于 2″的位置匹配[13]，亚毫米波阵列目前共监测了 436 个耀变体。通过肉眼仔细检视这些源的光变曲线，我们挑选 155 个在 1 mm 波段具有明显爆发现象且采样相对密集的耀变体。这个样本包括 25 个蝎虎座 BL 型天体，112 个平谱射电类星体，18 个类型未知的耀变体(BCUs)。另外，通过与第 4 版费米活动星系核星表(4LAC)匹配[14]，我们发现样本中的 104 个耀变体具有伽马射线辐射，称为费米耀变体(Fermi blazars)，其余的源称为非费米耀变体(Non-Fermi blazars)。作为示例，图 1 展示了样本中两个耀变体的 1 mm 光变曲线。

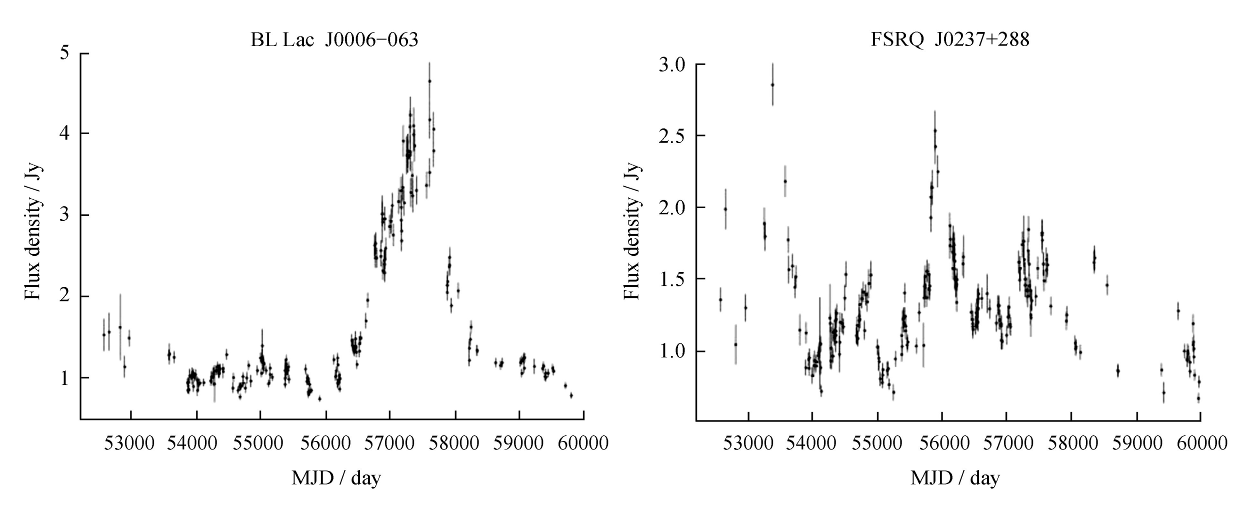


图 1 两个耀变体的 1 mm 光变曲线

Fig. 1 1 mm light curves of two blazars

2 方 法

我们采用与文[9]相同的方法对 155 个耀变体的 1 mm 光变曲线进行拟合。本文仅简要描述该方法，具体方法细节和 Python 程序代码可见文[9]、文[15]和 https://github.com/dhuppenkothen/magnetron2/tree/blazars。Magnetron 是一个用 Python 语言实现的贝叶斯分层模型，它将光变曲线建模为一系列爆发过程的叠加，每个爆发过程分为指数上升过程和指数下降过程。爆发过程的个数是一个自由参数，每个爆发过程由 4 个参数表征，即位置、光变幅度(以 Jy 为单位)、上升时间(以天为单位)和偏度(即下降时间与上升时间之比)。光变幅度定义为峰值流量和背景水平之间的差值。图 2 显示了利用 Magnetron 贝叶斯分层模型拟合两个源 1 mm 光变曲线的结果。

利用文[9]的方法，我们采用公式

$$T_{\mathrm{var}} = 1.47 \times 10^{13} \frac{d_{\mathrm{L}}^2 \Delta S_{\mathrm{ob}}(\nu)}{\nu^2 t_{\mathrm{var}}^2 (1+z)^4}\ \mathrm{K} \tag{1}$$

估算亮温度，其中，z 为红移；$\Delta S_{\mathrm{ob}}(\nu)$ 为光变振幅(单位为 Jy)；d_{L} 为光度距离(单位为 Mpc)；ν 为观测频率(单位为 GHz)；t_{var} 为爆发的上升时间(单位为天)。针对每个爆发过程计算 T_{var}，并找到其中

ChinaXiv合作期刊

的最大值 $T_{var,max}$。重复上述过程，对所有可用的模型(平均有 157 个)创建 $T_{var,max}$ 的分布。亮温度的计算结果及误差取 $T_{var,max}$ 分布的中值和 1σ 误差。155 个耀变体中，有两个蝎虎座 BL 型天体没有红移，在计算亮温度时取样本中蝎虎座 BL 型天体的红移平均值。图 3 展示了两个源的 $T_{var,max}$ 分布图。

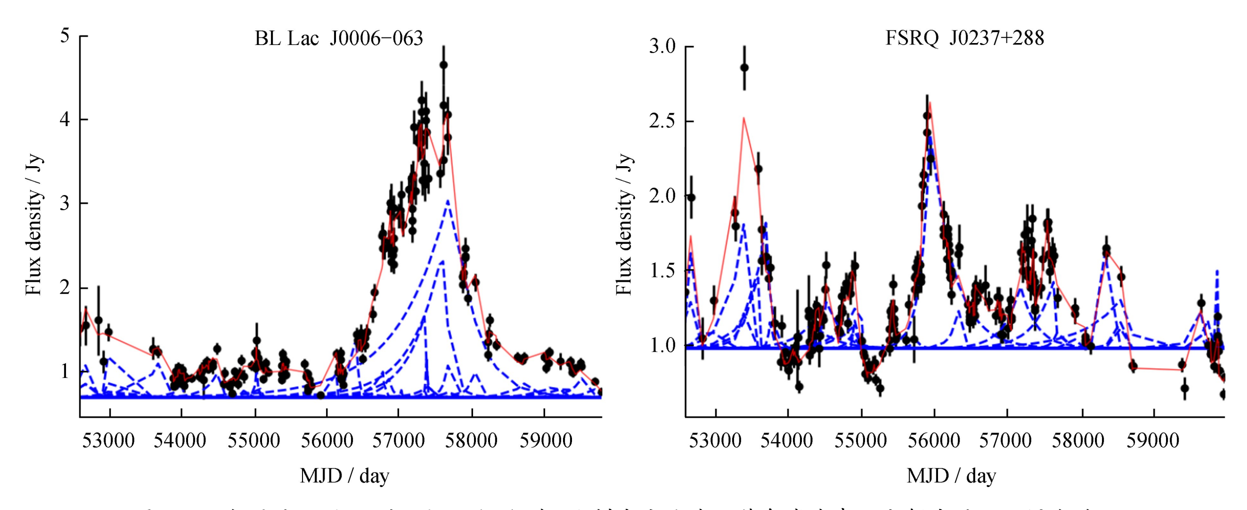


图 2　两个源的观测(黑点)和后验(红线)取样光变曲线。蓝色虚线表示分解出的独立爆发过程

Fig. 2　Observed (black points) and posterior sampled (red lines) light curves of two sources. The blue dashed lines represent the decomposed independent flares

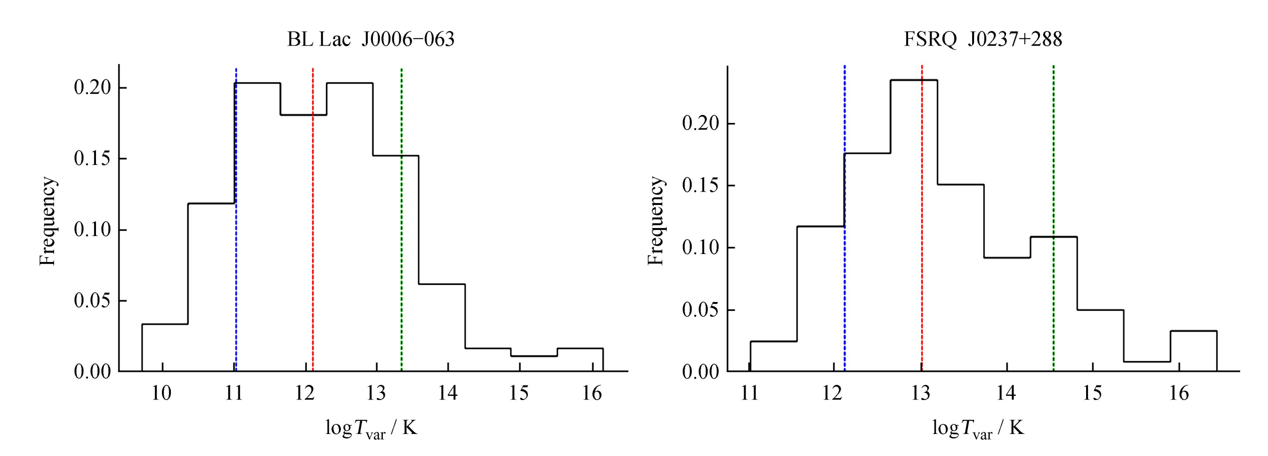


图 3　两个源的亮温度 $T_{var,max}$ 分布，红色虚线表示亮温度分布的中位数，蓝色和绿色之间的部分表示 1σ 置信区间

Fig. 3　The brightness temperature $T_{var,max}$ distribution of two sources, where the red dashed line represents the median brightness temperature and the region between the blue and green dashed lines represents the 1σ confidence interval

耀变体的辐射特性与聚束效应有关，应考虑多普勒因子修正。我们利用文[9]的方法计算了光变多普勒因子，

$$\delta_{var} = (1 + z)\sqrt[3]{\frac{T_{var}}{T_{eq}}}\ . \qquad (2)$$

为了计算 δ_{var}，我们从每个源的 $T_{var,max}$ 分布的中值和 1σ 误差范围内取出一个随机值。根据文[9]，从平均值为 $\langle T_{eq}\rangle = 2.78 \times 10^{11}$ K，标准偏差为 $\sigma_{T_{eq}} = 7.2 \times 10^{10}$ 的高斯分布中取出 T_{eq} 的随机值。我们使用(2)式计算光变多普勒因子 δ_{var}。重复上述过程 1 000 次，从而为每个源创建了 δ_{var} 的分布。最后，根据每个源的 δ_{var} 分布，得到多普勒因子的中位数和 1σ 置信区间。

3　结果与讨论

本文共估算了 155 个耀变体在 1 mm 波段的亮温度和光变多普勒因子，结果见表 1。第 1 列为源

ChinaXiv:202311.00008v1

ChinaXiv合作期刊

名；第 2 列为耀变体类型；第 3 列表示源是否为费米耀变体，Y 为费米耀变体，N 为非费米耀变体；第 4 列为红移；第 5 列为对数亮温度及其误差，单位为 K；第 6 列为光变多普勒因子及误差。图 4 和图 5 展示了 155 个耀变体的射电亮温度和光变多普勒因子的分布情况。

表 1 155 个耀变体的射电亮温度和光变多普勒因子

Table 1 The radio brightness temperatures and variability Doppler factors of 155 blazars

Name (1)	Type (2)	Fermi (3)	z (4)	$\log T_{var}$/K (5)	δ_{var} (6)	Name (1)	Type (2)	Fermi (3)	z (4)	$\log T_{var}$/K (5)	δ_{var} (6)
J0006−063	BL Lac	N	0.347	$12.1^{+1.24}_{-1.07}$	$3.25^{+1.66}_{-0.76}$	J0457+067	FSRQ	N	0.405	$11.4^{+2.12}_{-1.79}$	$2.37^{+2.7}_{-0.89}$
J0019+734	FSRQ	Y	1.781	$13.34^{+1.27}_{-1.15}$	$19.76^{+7.17}_{-6.69}$	J0457−234	FSRQ	Y	1.003	$13.35^{+1.19}_{-1.4}$	$12.71^{+6.28}_{-2.74}$
J0050−094	BL Lac	Y	0.635	$10.74^{+2.03}_{-1.22}$	$1.78^{+1.31}_{-0.66}$	J0501−019	FSRQ	Y	2.291	$13.66^{+1.64}_{-1.43}$	$34.42^{+22.95}_{-12.44}$
J0102+584	BCU	Y	0.644	$13.09^{+1.46}_{-0.7}$	$9.77^{+4.43}_{-3.94}$	J0510+180	FSRQ	Y	0.416	$13.2^{+1.13}_{-1.02}$	$7.14^{+2.36}_{-1.63}$
J0106−405	FSRQ	N	0.584	$12.82^{+2.28}_{-2.19}$	$10.01^{+6.45}_{-4.17}$	J0522−364	BCU	Y	0.056	$12.84^{+1.37}_{-0.93}$	$4.82^{+2.03}_{-1.44}$
J0121+118	FSRQ	N	0.57	$11.36^{+1.69}_{-1.49}$	$2.6^{+1.57}_{-0.96}$	J0530+135	FSRQ	Y	2.07	$13.91^{+1.05}_{-1.04}$	$32.31^{+8.73}_{-9.13}$
J0136+478	FSRQ	Y	0.859	$13.77^{+1.07}_{-0.93}$	$14.61^{+5.75}_{-2.74}$	J0532+075	FSRQ	Y	1.254	$13.1^{+1.72}_{-1.56}$	$13.56^{+9.04}_{-4.25}$
J0137−245	FSRQ	Y	0.835	$12.73^{+1.45}_{-1.58}$	$9.73^{+3.58}_{-4.17}$	J0533+483	FSRQ	Y	1.16	$11.83^{+1.05}_{-0.93}$	$3.7^{+1.89}_{-0.72}$
J0204−170	FSRQ	N	1.74	$12.23^{+2.02}_{-1.49}$	$8.77^{+9.38}_{-3.04}$	J0538−440	BL Lac	Y	0.892	$13.87^{+1.05}_{-0.93}$	$16.48^{+2.78}_{-3.61}$
J0205+322	FSRQ	N	1.466	$12.73^{+1.95}_{-1.27}$	$9.88^{+10.95}_{-2.9}$	J0607−085	FSRQ	Y	0.87	$10.82^{+2.16}_{-1.03}$	$2.64^{+2.06}_{-1.18}$
J0224+069	FSRQ	N	0.511	$14.15^{+1.17}_{-1.45}$	$18.09^{+6.21}_{-4.89}$	J0609−157	FSRQ	N	0.324	$13.21^{+1.36}_{-1.86}$	$7.95^{+4.37}_{-2.1}$
J0228+673	FSRQ	N	0.523	$11.36^{+1.59}_{-1.66}$	$2.46^{+1.6}_{-0.77}$	J0646+448	FSRQ	N	3.396	$10.14^{+2.52}_{-2.08}$	$4.46^{+2.28}_{-2.22}$
J0237+288	FSRQ	Y	1.206	$13.01^{+0.9}_{-1.53}$	$12.03^{+7.15}_{-3.72}$	J0725+144	FSRQ	Y	1.038	$14.58^{+1.37}_{-1.84}$	$42.79^{+14.16}_{-14.9}$
J0238+166	BL Lac	Y	0.94	$13.87^{+1.08}_{-0.66}$	$15.12^{+5.37}_{-2.53}$	J0730−116	FSRQ	Y	1.589	$12.52^{+1.47}_{-0.64}$	$7.71^{+4.53}_{-1.5}$
J0241−082	BCU	N	0.005	$8.58^{+2.07}_{-1.85}$	$0.22^{+0.19}_{-0.09}$	J0738+177	BL Lac	Y	0.424	$10.87^{+2.7}_{-1.53}$	$2.35^{+2.69}_{-0.93}$
J0242+110	FSRQ	N	2.68	$10.74^{+2.24}_{-1.27}$	$3.8^{+3.13}_{-1.31}$	J0739+016	FSRQ	Y	0.189	$13.37^{+1.01}_{-0.75}$	$6.96^{+2.66}_{\mp 1.61}$
J0303+472	BL Lac	Y		$11.59^{+1.13}_{-1.34}$	$2.42^{+0.92}_{-0.53}$	J0748+240	FSRQ	Y	0.409	$13.15^{+1.7}_{-1.18}$	$9.1^{+5.22}_{-3.02}$
J0309+104	FSRQ	Y	0.863	$12.92^{+1.74}_{-1.51}$	$9.24^{+8.09}_{-2.42}$	J0750+125	FSRQ	N	0.889	$12.43^{+1.66}_{-1.36}$	$6.92^{+4.29}_{-2.41}$
J0310+382	FSRQ	Y	0.945	$13.02^{+1.95}_{-1.77}$	$15.49^{+7.46}_{-7.76}$	J0757+099	BL Lac	Y	0.266	$14.11^{+1.16}_{-1.2}$	$15.28^{+4.76}_{-4.56}$
J0313+413	BCU	Y	0.136	$12.42^{+2.06}_{-2.71}$	$4.93^{+4.24}_{-1.89}$	J0808−078	FSRQ	Y	1.837	$14.01^{+1.53}_{-2.42}$	$33.01^{+21.89}_{-9.92}$
J0319+415	BCU	Y	0.018	$9.5^{+1.71}_{-0.61}$	$0.31^{+0.39}_{-0.08}$	J0825+031	BL Lac	Y	0.506	$13.79^{+1.41}_{-1.33}$	$13.4^{+6.52}_{-3.4}$
J0334−401	BL Lac	Y	1.445	$13.11^{+1.63}_{-1.35}$	$17.13^{+9.14}_{-6.97}$	J0826−225	BL Lac	Y	0.91	$12^{+1.7}_{-1.51}$	$5.54^{+3.16}_{-2.19}$
J0336+323	FSRQ	N	1.259	$13.58^{+1.26}_{-1.09}$	$15.89^{+7.02}_{-3.31}$	J0830+241	FSRQ	Y	0.939	$14.32^{+0.95}_{-0.98}$	$23.87^{+7.08}_{-4.97}$
J0339−017	FSRQ	Y	0.85	$13.59^{+1.1}_{-1.09}$	$14.36^{+3.81}_{-3.92}$	J0841+708	FSRQ	Y	2.218	$14.29^{+0.89}_{-1.05}$	$37.46^{+8.48}_{-6.66}$
J0348−278	FSRQ	Y	0.991	$13.19^{+1.9}_{-2.11}$	$14.77^{+9.68}_{-5.41}$	J0854+201	BL Lac	Y	0.306	$13.86^{+0.96}_{-0.85}$	$11.02^{+2.88}_{-2.32}$
J0359+509	FSRQ	N	1.512	$12.79^{+1.55}_{-0.82}$	$10.26^{+5.51}_{-2.99}$	J0920+446	FSRQ	Y	2.19	$12.25^{+1.73}_{-1.11}$	$10.51^{+5.44}_{-3.84}$
J0403−360	FSRQ	Y	1.417	$13.78^{+1.36}_{-1.47}$	$20.14^{+9.12}_{-4.7}$	J0921+622	FSRQ	Y	1.446	$11.03^{+1.75}_{-1.5}$	$3.09^{+1.58}_{-0.83}$
J0423−013	FSRQ	Y	0.916	$13.71^{+0.9}_{-0.97}$	$14.28^{+4.17}_{-2.98}$	J0927+390	FSRQ	N	0.695	$11.18^{+1.29}_{-1.2}$	$2.02^{+0.9}_{-0.49}$
J0428−379	BL Lac	Y	1.11	$13.98^{+1.8}_{-1.09}$	$22.23^{+23.78}_{-4.91}$	J0927−205	FSRQ	N	0.348	$11.91^{+2.76}_{-1.46}$	$4.81^{+6.89}_{-2.54}$
J0433+053	BCU	N	0.033	$12.82^{+0.99}_{-1}$	$4.04^{+1.08}_{-1.06}$	J0937+501	FSRQ	Y	0.276	$14.33^{+1.04}_{-1.23}$	$16.7^{+5.36}_{-4.1}$
J0449+113	FSRQ	Y	2.153	$14.02^{+1.23}_{-1.41}$	$25.52^{+12.35}_{-8.95}$	J0958+655	BL Lac	Y	0.367	$14.79^{+0.98}_{-0.96}$	$24.6^{+5.76}_{-5.78}$

ChinaXiv:202311.00008v1

ChinaXiv合作期刊

续表 1

Name (1)	Type (2)	Fermi (3)	z (4)	$\log T_{var}$/K (5)	δ_{var} (6)	Name (1)	Type (2)	Fermi (3)	z (4)	$\log T_{var}$/K (5)	δ_{var} (6)
J1018+357	FSRQ	N	1.229	$12.55^{+1.56}_{-1.64}$	$8.25^{+5.45}_{-2.85}$	J1504+104	FSRQ	Y	1.839	$13.19^{+1.22}_{-0.74}$	$13.81^{+6.95}_{-2.87}$
J1037−295	FSRQ	N	0.312	$14.49^{+0.85}_{-1.49}$	$18.7^{+3.4}_{-3.75}$	J1512−090	FSRQ	Y	0.36	$14.15^{+0.92}_{-0.82}$	$13.86^{+4.07}_{-2.84}$
J1041+061	FSRQ	N	1.264	$12.55^{+1.73}_{-1.16}$	$8.21^{+5.79}_{-2.08}$	J1516+002	BL Lac	N	0.052	$10.39^{+2.09}_{-1.47}$	$0.8^{+0.61}_{-0.28}$
J1043+241	FSRQ	Y	0.56	$13.83^{+1.45}_{-1.81}$	$16.24^{+5.49}_{-4.94}$	J1517−243	BL Lac	Y	0.048	$11.47^{+1.75}_{-0.98}$	$1.54^{+0.75}_{-0.39}$
J1044+809	FSRQ	Y	1.254	$13.43^{+1.59}_{-1.63}$	$16.15^{+8.78}_{-2.85}$	J1522−275	BL Lac	Y	1.297	$9.2^{+2.6}_{-1.47}$	$0.82^{+1.09}_{-0.34}$
J1048+717	BCU	Y	1.15	$14.82^{+0.9}_{-1.18}$	$40.34^{+9.35}_{-9.53}$	J1549+026	FSRQ	Y	0.414	$13.87^{+1.13}_{-1.12}$	$14.16^{+5.02}_{-4.17}$
J1048−191	FSRQ	N	0.595	$13.32^{+1.52}_{-2.02}$	$13.24^{+4.78}_{-4.69}$	J1550+054	FSRQ	N	1.422	$12.47^{+1.34}_{-1.64}$	$8.75^{+4.08}_{-2.29}$
J1058+015	BCU	Y	0.89	$13.5^{+1.1}_{-0.82}$	$12.09^{+3.96}_{-2.79}$	J1613+342	FSRQ	Y	1.397	$11.38^{+1.37}_{-0.88}$	$3.3^{+1.38}_{-0.9}$
J1104+382	BL Lac	Y	0.03	$7.74^{+2.9}_{-2.51}$	$0.18^{+0.15}_{-0.08}$	J1625−254	BCU	Y	0.786	$13.62^{+1.29}_{-0.82}$	$13.86^{+7.17}_{-3.34}$
J1127−189	FSRQ	Y	1.048	$23.57^{+1.24}_{-0.8}$	$6.02^{+2.93}_{-1.05}$	J1626−298	BCU	Y	0.815	$14.21^{+1.14}_{-0.65}$	$21.05^{+9.11}_{-5.72}$
J1130−148	FSRQ	N	1.184	$13.68^{+1.5}_{-1.12}$	$19.62^{+9.02}_{-5.46}$	J1635+381	FSRQ	Y	1.814	$14.06^{+0.88}_{-0.99}$	$27.91^{+6.66}_{-6.24}$
J1146+399	FSRQ	Y	1.089	$13.05^{+1.28}_{-0.87}$	$10.87^{+3.42}_{-2.94}$	J1637+472	FSRQ	Y	0.735	$12.5^{+1.19}_{-1.13}$	$6.9^{+1.5}_{-1.91}$
J1153+495	FSRQ	Y	0.334	$13.05^{+1.23}_{-1.03}$	$7.38^{+2.7}_{-2.25}$	J1638+573	FSRQ	N	0.751	$13.45^{+1.48}_{-0.9}$	$13.92^{+8.39}_{-4.31}$
J1159+292	FSRQ	Y	0.729	$13.67^{+1.2}_{-1.04}$	$13.29^{+6.21}_{-2.96}$	J1640+397	FSRQ	Y	1.66	$13.18^{+1.4}_{-2.12}$	$15.9^{+5.98}_{-4.64}$
J1159−224	BCU	Y	0.565	$13.25^{+1.67}_{-1.78}$	$11.05^{+6.47}_{-3.89}$	J1642+398	FSRQ	Y	0.593	$14.4^{+0.91}_{-1.18}$	$21.6^{+5.29}_{-5.03}$
J1203+480	FSRQ	N	0.817	$10.25^{+1.93}_{-1.45}$	$1.18^{+0.97}_{-0.38}$	J1642+689	FSRQ	N	0.751	$12.94^{+1.88}_{-1.87}$	$11.93^{+9.61}_{-5.27}$
J1222+042	FSRQ	N	0.966	$14.71^{+1.05}_{-1.25}$	$34.11^{+13.33}_{-8.47}$	J1658+076	FSRQ	N	0.621	$12.17^{+2.27}_{-1.57}$	$5.78^{+3.84}_{-2.17}$
J1224+213	FSRQ	Y	0.434	$12.18^{+1.34}_{-0.75}$	$3.46^{+1.63}_{-0.76}$	J1719+177	BL Lac	Y	0.137	$10.84^{+2.52}_{-2.18}$	$1.75^{+1.05}_{-0.78}$
J1229+020	FSRQ	Y	0.158	$13.25^{+0.9}_{-0.59}$	$5.96^{+1.53}_{-1.31}$	J1727+455	FSRQ	Y	0.717	$13.43^{+1.3}_{-1.09}$	$14.34^{+5.11}_{-4.41}$
J1239+075	BCU	N	0.4	$9.95^{+2.09}_{-1.35}$	$1.1^{+0.52}_{-0.59}$	J1728+044	FSRQ	Y	0.293	$13.26^{+1.58}_{-3.09}$	$8.79^{+5.98}_{-2.91}$
J1246−257	FSRQ	Y	0.635	$13.96^{+1.14}_{-0.81}$	$16.13^{+7.68}_{-3.94}$	J1733−130	FSRQ	Y	0.902	$13.02^{+1.2}_{-1.12}$	$9.48^{+2.96}_{-2.59}$
J1254+116	FSRQ	N	0.872	$12.44^{+2.01}_{-2.07}$	$6.6^{+6.32}_{-2.07}$	J1743−038	FSRQ	N	1.057	$12.98^{+1.22}_{-0.86}$	$9.96^{+4.53}_{-2.54}$
J1256−057	FSRQ	Y	0.536	$13.39^{+1.04}_{-0.69}$	$8.85^{+3.76}_{-2.24}$	J1751+096	BL Lac	Y	0.322	$13.62^{+1.17}_{-0.86}$	$11.58^{+3.3}_{-3.47}$
J1258−223	FSRQ	Y	1.303	$12.27^{+2.32}_{-1.2}$	$10.64^{+6.94}_{-4.94}$	J1800+784	BL Lac	Y	0.68	$14^{+1.42}_{-1.29}$	$17.71^{+7.82}_{-4.69}$
J1305−105	FSRQ	N	0.286	$12.16^{+1.46}_{-1.43}$	$4.47^{+1.47}_{-1.54}$	J1806+698	BL Lac	Y	0.046	$11.8^{+1.47}_{-1.55}$	$2.17^{+1.27}_{-0.64}$
J1310+323	BCU	Y	0.997	$13.78^{+1.29}_{-1.57}$	$17.63^{+7.93}_{-3.74}$	J1824+568	BL Lac	Y	0.663	$12.67^{+1.54}_{-1.31}$	$7.42^{+4.04}_{-2.23}$
J1316−336	FSRQ	Y	1.21	$13.57^{+1.51}_{-0.9}$	$17.86^{+10.19}_{-5.12}$	J1830+063	FSRQ	N	0.745	$12.39^{+1.74}_{-1.45}$	$5.98^{+4.36}_{-1.54}$
J1325−430	BCU	Y	0.002	$8.08^{+1.66}_{-1.45}$	$0.13^{+0.07}_{-0.05}$	J1842+681	FSRQ	N	0.472	$11.5^{+2.55}_{-1.57}$	$3.68^{+5.55}_{-1.52}$
J1327+221	FSRQ	N	1.398	$13.58^{+1.39}_{-1.13}$	$20.87^{+8.54}_{-6.97}$	J1849+670	FSRQ	Y	0.657	$13.43^{+1.17}_{-1.17}$	$12.36^{+4.64}_{-3.29}$
J1337−129	FSRQ	Y	0.539	$13.69^{+1.28}_{-1.06}$	$13.29^{+6.54}_{-3.61}$	J1902+319	FSRQ	N	0.635	$10.82^{+1.9}_{-1.74}$	$1.81^{+1.25}_{-0.59}$
J1357+193	FSRQ	N	0.72	$13.96^{+1.31}_{-1.39}$	$7.99^{+3.43}_{-1.79}$	J1911−201	FSRQ	Y	1.119	$13.86^{+1.26}_{-0.99}$	$19.46^{+9.41}_{-4.39}$
J1415+133	BCU	N	0.247	$13^{+1.05}_{-0.98}$	$5.69^{+1.37}_{-1.19}$	J1923−210	FSRQ	Y	0.874	$13.3^{+1.51}_{-1.39}$	$12.11^{+6.56}_{-3.57}$
J1419+543	BL Lac	Y	0.153	$12.09^{+1.08}_{-1.27}$	$2.64^{+0.9}_{-0.6}$	1924−292	FSRQ	Y	0.353	$14.17^{+0.94}_{-0.91}$	$15.23^{+3.48}_{-3.84}$
J1427−421	FSRQ	Y	1.522	$13.08^{+1.44}_{-1.05}$	$14.23^{+8.45}_{-4.72}$	J1927+739	FSRQ	N	0.302	$12.97^{+1.44}_{-1.07}$	$6.17^{+3.07}_{-1.54}$
J1446+173	FSRQ	N	1.024	$9.82^{+1.96}_{-1.36}$	$0.99^{+0.84}_{-0.3}$	J2000−178	FSRQ	Y	0.652	$14.65^{+1.11}_{-1.2}$	$27.85^{+11.03}_{-5.26}$

ChinaXiv:202311.00008v1

ChinaXiv合作期刊

续表 1

Name (1)	Type (2)	Fermi (3)	z (4)	$\log T_{\mathrm{var}}/\mathrm{K}$ (5)	δ_{var} (6)	Name (1)	Type (2)	Fermi (3)	z (4)	$\log T_{\mathrm{var}}/\mathrm{K}$ (5)	δ_{var} (6)
J2007+404	FSRQ	N	1. 736	$9.8^{+1.45}_{-0.95}$	$1.19^{+0.53}_{-0.26}$	J2225−049	FSRQ	Y	1. 404	$11.1^{+1.41}_{-1.23}$	$3.06^{+1.24}_{-1.01}$
J2011−157	FSRQ	N	1. 178	$13.58^{+1.53}_{-1.15}$	$21.87^{+6.66}_{-7.13}$	J2229−085	FSRQ	Y	1. 56	$14.81^{+0.95}_{-1.02}$	$44.88^{+14.23}_{-9.73}$
J2015+371	BCU	Y	0. 859	$13.77^{+1.06}_{-1.23}$	$13.26^{+4.68}_{-1.76}$	J2232+117	FSRQ	Y	1. 037	$14.79^{+1.34}_{-1.08}$	$46.86^{+18.96}_{-15.44}$
J2025+337	BCU	N	0. 219	$12.54^{+1.13}_{-1.23}$	$4.3^{+1.21}_{-1.03}$	J2236+284	FSRQ	Y	0. 79	$14^{+1.14}_{-1.22}$	$18.91^{+7.42}_{-4.45}$
J2038+513	FSRQ	N	1. 686	$11.72^{+1.74}_{-2.14}$	$6.46^{+1.96}_{-2.41}$	J2246−121	FSRQ	N	0. 632	$10.53^{+2.39}_{-2.44}$	$2.62^{+1.45}_{-1.06}$
J2123+055	FSRQ	Y	1. 941	$13.59^{+1.89}_{-1.32}$	$33.52^{+17.74}_{-14.11}$	J2258−279	FSRQ	Y	0. 926	$12.81^{+1.54}_{-0.97}$	$7.87^{+4.06}_{-1.84}$
J2148+069	FSRQ	N	0. 999	$13.16^{+1.27}_{-1.43}$	$11.6^{+5.26}_{-3.37}$	J2327+096	FSRQ	Y	1. 843	$14.46^{+1.09}_{-1.51}$	$42.51^{+14}_{-10.55}$
J2158−150	FSRQ	Y	0. 672	$14.17^{+1.17}_{-1.37}$	$21.19^{+8.18}_{-5.52}$	J2333−237	BCU	N	0. 048	$11.99^{+1.48}_{-1.73}$	$2.63^{+1.03}_{-0.63}$
J2202+422	BL Lac	Y	0. 069	$13.17^{+1.35}_{-0.31}$	$4.15^{+2.79}_{-0.7}$	J2334+076	FSRQ	Y	0. 401	$12.53^{+2.18}_{-2.63}$	$7.35^{+5.05}_{-2.94}$
J2203+174	FSRQ	Y	1. 076	$10.75^{+2.33}_{-1}$	$2.28^{+3.43}_{-0.94}$	J2348−165	FSRQ	Y	0. 576	$13.69^{+1.36}_{-1.19}$	$13.32^{+6.08}_{-4.04}$
J2217+243	BL Lac	Y		$10.72^{+2.16}_{-1.74}$	$1.85^{+1.6}_{-0.7}$	J2358−103	FSRQ	N	1. 638	$14.38^{+1.24}_{-1.16}$	$34.89^{+14.44}_{-8.4}$
J2218−035	FSRQ	N	0. 901	$11.88^{+2.39}_{-1.93}$	$5.83^{+7.04}_{-2.62}$						

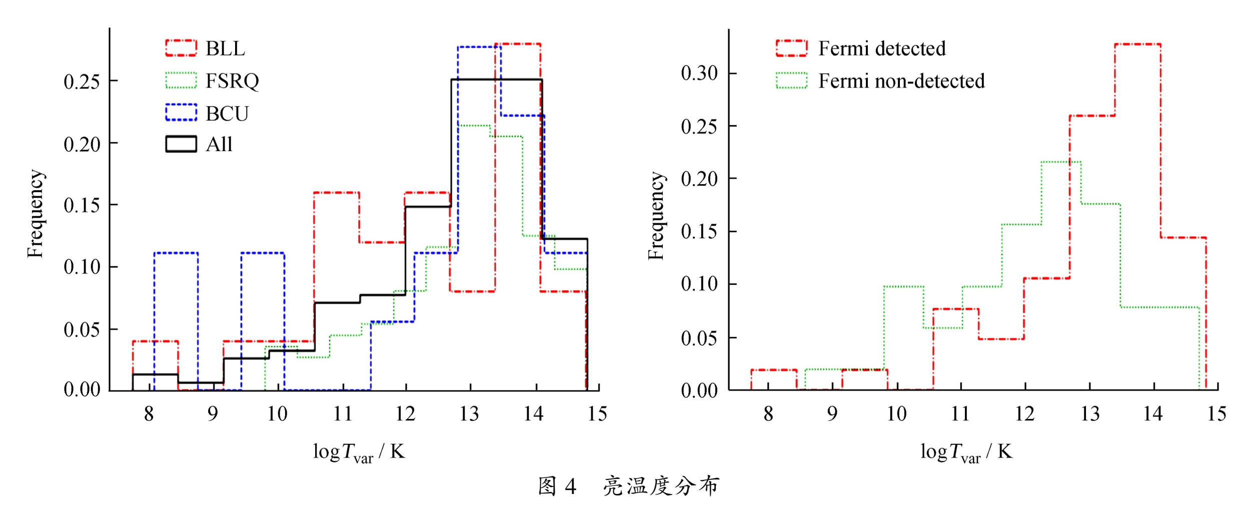


图 4　亮温度分布

Fig. 4　Brightness temperature distributions

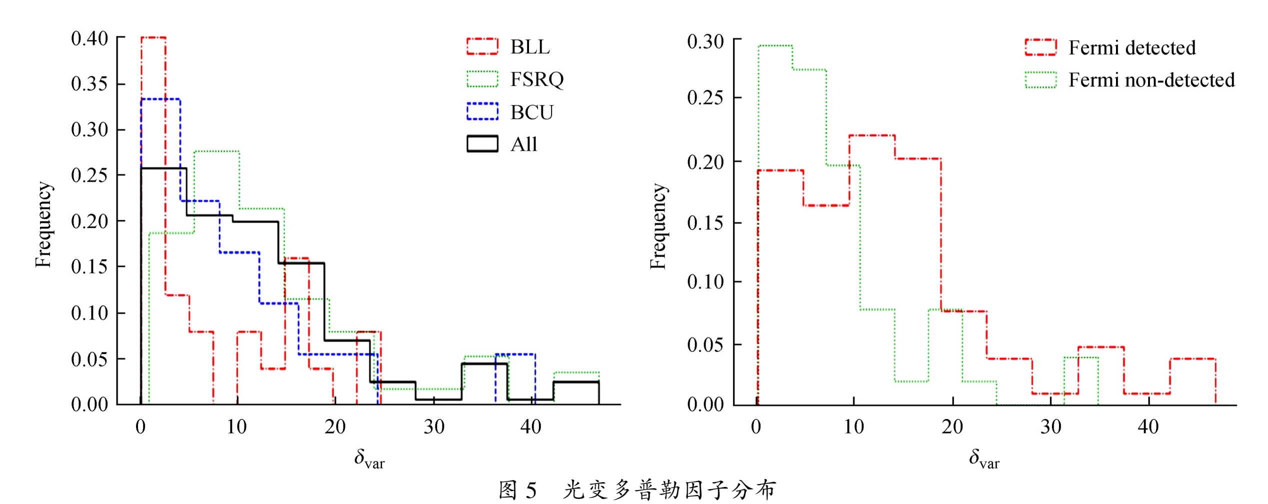


图 5　光变多普勒因子分布

Fig. 5　Variability Doppler factor distributions

ChinaXiv:202311.00008v1

ChinaXiv合作期刊

ChinaXiv:202311.00008v1

利用 Wilcoxon 秩和检验，我们分别比较了蝎虎座 BL 型天体和平谱射电类星体、费米耀变体和非费米耀变体的亮温度和多普勒因子分布。每个子样本的亮温度和多普勒因子中位数及误差见表 2。Wilcoxon 秩和检验结果表明：

(1)蝎虎座 BL 型天体和平谱射电类星体亮温度分布不存在显著差异($p=0.12$)，但两者的多普勒因子分布存在显著差异($p=0.006$)，平谱射电类星体平均具有更大的多普勒因子($11.24^{+10.37}_{-7.52}$ vs $4.15^{+13.56}_{-3.33}$)。文[9]认为平谱射电类星体和蝎虎座 BL 型天体的观测视角(θ)可能没有显著差异，但前者具有相对更快速运动的喷流，至少能解释这两种耀变体子类之间的多普勒因子分布差异。

表 2　耀变体子类的亮温度和多普勒因子中位数及误差

Table 2　Median brightness temperatures and Doppler factors of different blazar subclasses and corresponding errors

Subclass name	Median brightness temperature/K	Median Doppler factor
BL Lacs	$12.1^{+1.9}_{-1.71}$	$4.15^{+13.56}_{-3.33}$
FSRQs	$13.17^{+0.89}_{-1.67}$	$11.24^{+10.37}_{-7.52}$
BCUs	$12.92^{+1.29}_{-4.34}$	$5.31^{+15.74}_{-5.09}$
Fermi blazars	$13.34^{+0.77}_{-1.54}$	$13.27^{+8.96}_{-10.18}$
Non-Fermi blazars	$12.44^{+1.14}_{-1.91}$	$6.17^{+9.72}_{-4.15}$

(2)费米耀变体和非费米耀变体的亮温度和多普勒因子分布均存在显著差异(p 值分别为 1.73×10^{-5} 和 2.3×10^{-4})。相对非费米耀变体，费米耀变体平均具有更大的亮温度($13.34^{+0.77}_{-1.54}$ vs $12.44^{+1.14}_{-1.91}$ K)和多普勒因子($13.27^{+8.96}_{-10.18}$ vs $6.17^{+9.72}_{-4.15}$)。这个统计结果暗示耀变体是否能被探测到伽马射线辐射可能与多普勒效应有关[9,16-17]。

文[9]使用相同的方法估算了耀变体在 15 GHz 波段的光变多普勒因子。将文中样本和他们的样本进行交叉证认，发现具有 123 个公共源，其中包括 16 个蝎虎座 BL 型天体，95 个平谱射电类星体，12 个未知类型的耀变体。图 6 和图 7 给出了 123 个公共源 1 mm 和 15 GHz 的亮温度和多普勒因子比较情况。在 15 GHz 波段，亮温度分布的中位数为 $13.97^{+1.04}_{-1.69}$；在 1 mm 波段，亮温度分布的中位数为 $13.09^{+0.92}_{-1.91}$，前者大于后者。Wilcoxon 秩和检验结果也表明，1 mm 波段亮温度小于 15 GHz 波段(p 值为 9.47×10^{-9})。在 15 GHz 波段，多普勒因子分布的中位数为 $12.23^{+18.48}_{-8.07}$；在 1 mm 波段，多普勒因子分布的中位数为 $9.77^{+11.42}_{-7.13}$，前者大于后者。Wilcoxon 秩和检验结果同样表明，1 mm 波段多普勒因子平均小于 15 GHz 波段(p 值为 0.028)。

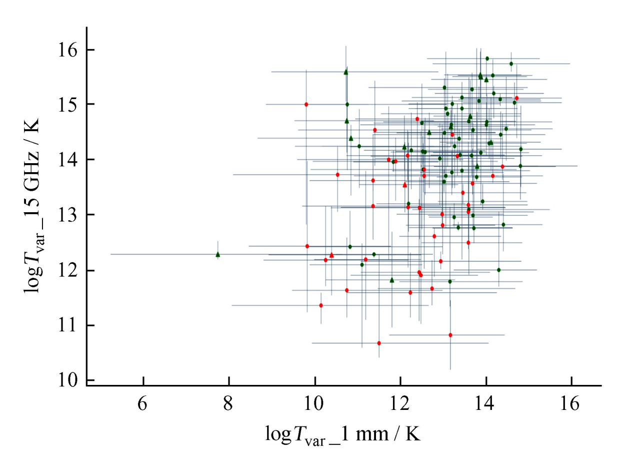


图 6　1 mm 与 15 GHz 波段的亮温度比较。三角形表示蝎虎 BL 型天体，圆点表示平谱射电类星体，红色表示非费米耀变体，绿色表示费米耀变体

Fig. 6　Comparison of brightness temperatures between 1 mm and 15 GHz bands. Triangles represent BL Lac, dots represent FSRQs, red indicates non-Fermi blazars, and green indicates Fermi blazars

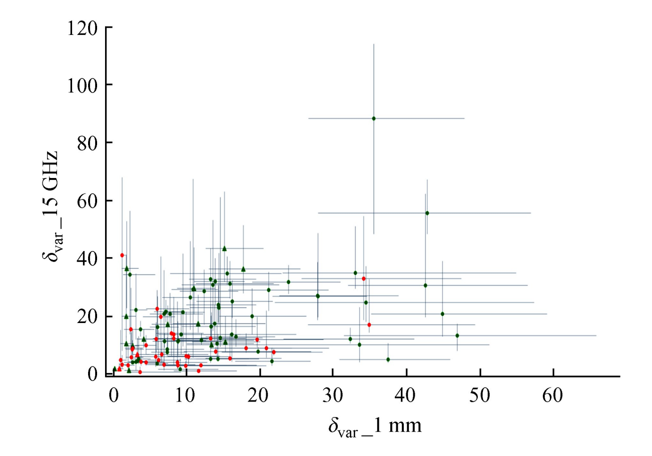


图 7　1 mm 与 15 GHz 波段的多普勒因子比较。三角形表示蝎虎 BL 型天体，圆点表示平谱射电类星体，红色表示非费米耀变体，绿色表示费米耀变体

Fig. 7　Comparison of Doppler factors between 1 mm and 15 GHz bands. Triangles represent BL Lac, dots represent FSRQs, red indicates non-Fermi blazars, and green indicates Fermi blazars

ChinaXiv合作期刊

文[16]和文[18]发现部分耀变体的射电亮温度可能随观测频率增加而降低，多普勒因子自然也随频率增加而降低。他们认为射电光变多普勒因子依赖观测频率的现象可能与喷流加速或喷流弯曲有关。不同频率的射电观测定位在不同的喷流区域，1 mm 波段观测比 15 GHz 波段观测更靠近喷流内区。在喷流加速模型下，两个区域中喷流成分运动速度的差异可能导致 1 mm 波段和 15 GHz 波段的多普勒因子不同。另外，喷流的弯曲现象导致在不同射电波段的观测视角不同，这也可能导致 1 mm 波段和 15 GHz 波段的多普勒因子不同，但文[16]和文[18]认为这种可能性相对较低。在本文中，我们基于一个统计样本，发现了射电亮温度和光变多普勒因子对观测频率的依赖性，支持文[16]和文[18]的部分研究结果，并且首次将他们的研究结果推至亚毫米波段。但需要强调两点：(1)样本容量较小，并且样本由平谱射电类星体主导(112/155)。样本中的蝎虎座 BL 型天体较少(仅 25 个)，因此将来扩充样本(特别是加入更多的射电亮蝎虎座 BL 型天体)来验证文中结论很有必要；(2)我们的研究是基于耀变体子类间的整体样本比较，需要注意到文[16]发现射电光变多普勒因子对观测频率的依赖只是对于部分源而言，也存在一些源的多普勒因子随着观测频率的增加而增加，或者不明显依赖观测频率。

致谢：感谢亚毫米波阵列的首席科学家 Mark Gurwell 教授授权我们使用光变曲线数据。亚毫米波阵列是美国史密森天文台和中国台湾天文与天体物理研究所的联合项目，由史密森协会和中研院资助。亚毫米波阵列位于夏威夷土著居民的文化圣地莫纳克亚(Mauna Kea)，被特许在莫纳克亚山峰探索宇宙。

参考文献：

[1] HOVATTA T, VALTAOJA E, TORNIKOSKI M, et al. Doppler factors, Lorentz factors and viewing angles for quasars, BL Lacertae objects and radio galaxies [J]. Astronomy and Astrophysics, 2009, 494(2): 527-537.

[2] URRY C M, PADOVANI P. Unified schemes for radio-loud active galactic nuclei [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1995, 107(715): 803-845.

[3] ZHANG L, CHEN S, XIAO H, et al. Doppler factor estimation for Fermi blazars [J]. The Astrophysical Journal, 2020, 897(1): 10-19.

[4] FAN J H, HUANG Y, HE T M, et al. Radio variability and relativistic beaming effect for blazars [J]. Publications of the Astronomical Society of Japan, 2009, 61(4): 639-643.

[5] PEI Z, FAN J, YANG J, et al. The estimation of γ-ray Doppler factor for Fermi/LAT-detected blazars [J]. Publications of the Astronomical Society of Australia, 2020, 37: e043-e053.

[6] GHISELLINI G, PADOVANI P, CELOTTI A, et al. Relativistic bulk motion in active galactic nuclei [J]. The Astrophysical Journal, 1993, 407: 65-82.

[7] READHEAD A. Equipartition brightness temperature and the inverse Compton catastrophe [J]. The Astrophysical Journal, 1994, 426: 51-59.

[8] LÄHTEENMÄKI A, VALTAOJA E, WIIK K. Total flux density variations in extragalactic radio sources. II. Determining the limiting brightness temperature for synchrotron sources [J]. The Astrophysical Journal, 1999, 511(1): 112-117.

[9] LIODAKIS I, HOVATTA T, HUPPENKOTHEN D, et al. Constraining the limiting brightness temperature and Doppler factors for the largest sample of radio-bright blazars [J]. The Astrophysical Journal, 2018, 866(2): 137-149.

[10] CHEN L. On the jet properties of γ-ray-loud active galactic nuclei [J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2018, 235(2): 39-57.

ChinaXiv:202311.00008v1

ChinaXiv合作期刊

[11] KOMATSU E, DUNKLEY J, NOLTA M R, et al. Five-year wilkinson microwave anisotropy probe observations: cosmological interpretation [J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2009, 180(2): 330-376.

[12] GURWELL M A, PECK A B, HOSTLER S R, et al. Monitoring phase calibrators at submillimeter wavelengths [C] // Proceedings of the Astronomical Society of the Pacific Conference Series. 2007.

[13] MASSARO E, MASELLI A, LETO C, et al. The 5th edition of the Roma-BZCAT. A short presentation [J]. Astrophysics and Space Science, 2015, 357: 1-4.

[14] AJELLO M, ANGIONI R, AXELSSON M, et al. The fourth catalog of active galactic nuclei detected by the Fermi Large Area Telescope [J]. The Astrophysical Journal, 2020, 892(2): 105.

[15] HUPPENKOTHEN D, BREWER B J, HOGG D W, et al. Dissecting magnetar variability with Bayesian hierarchical models [J]. The Astrophysical Journal, 2015, 810(1): 66-87.

[16] FUHRMANN L, ANGELAKIS E, ZENSUS J A, et al. The F-GAMMA programme: multi-frequency study of active galactic nuclei in the Fermi era-programme description and the first 2. 5 years of monitoring [J]. Astronomy and Astrophysics, 2016, 596: A45-A63.

[17] LISTER M L, HOMAN D C, KADLER M, et al. A connection between apparent VLBA jet speeds and initial active galactic nucleus detections made by the fermi gamma-ray observatory [J]. The Astrophysical Journal, 2009, 696(1): L22-L26.

[18] LIODAKIS I, HOVATTA T, ALLER M F, et al. Identifying changing jets through their radio variability [J]. Astronomy and Astrophysics, 2021, 654: A169-A181.

Estimation of the Doppler Factors for Blazars Using a Bayesian Hierarchical Model

Ning Gongming, Huang Weitian, Mao Lisheng*

(School of Physics and Electronic Information, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China, Email: maolisheng@ynnu.edu.cn)

Abstract: Based on the long-term monitoring data at 1 mm wavelength from the Submillimeter Array (SMA), we used a Bayesian hierarchical model to fit the light curves of 155 blazars and estimated their radio brightness temperatures and variability Doppler factors. The brightness temperature and Doppler factor distributions between BL Lacertae objects (BL Lacs) and flat spectrum radio quasars (FSRQs), as well as between Fermi and non-Fermi blazars, were compared using the Wilcoxon rank-sum test. The results show that (1) FSRQs have higher average Doppler factor than BL Lacs; (2) Fermi blazars have higher average brightness temperature and Doppler factor than non-Fermi blazars. After comparing the brightness temperatures and variability Doppler factors at 1 mm and 15 GHz wavelengths, we found a tendency of decreasing towards higher frequencies for these two parameters.

Key words: Blazar; Doppler factor; brightness temperature; Bayesian hierarchical model

ChinaXiv:202311.00008v1